تعیین ناحیه‌ی بحرانی و قابلیت استفاده‌ی مجدد مخازن CNG فولادی در تصادم*

محمد یزدانی آریاتپه[۱] محمد مشایخی[۲]

چکیده در این مقاله با استفاده از مکانیک آسیب اثر تصادم و آسیب ناشی از آن در مخازن گاز طبیعی تحت فشار (CNG) فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. استاندارد CSA متداول در مخازن CNG، به‌عنوان معیار شناسایی آسیب و قابلیت استفاده مجدد مخزن پس از برخورد انتخاب شده است. برای محاسبه‌ی آسیب وارد به مخزن از مدل آسیب جانسون-کوک استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های اجزای محدود در جهت‌های مختلف برخورد انجام می‌شود و تأثیر فشار داخل مخزن و سرعت تصادم مورد بررسی قرار می‌گیرد و آسیب ناشی از برخورد برای حالت‌های مختلف ارزیابی می‌شود. نتایج تحلیل نشان می‌دهد آسیب انباشته شده در مخزن هنگام برخورد در راستای عمودی بیش‌تر از امتداد افقی است و در شرایط یکسان بارگذاری در تصادم عمودی مخزن، آسیب بیش‌تری به مخزن وارد می‌شود.

واژه‌های کلیدی مخازن CNG استوانه‌ای، تصادم، شکست، مکانیک آسیب.

Determination of the Critical Area and Reusability of Compressed Natural Gas Storage Cylinder in Collision

M. Yazdani Ariatape M. Mashayekhi

Abstract *In this paper, damage mechanics approach is used to investigate the effects of crash in Compressed Natural Gas (CNG) storage cylinder. The Canadian Standard Association (CSA) in CNG cylinders is used as a damage detection criterion and cylinders ability to reuse. Simulation of cylinder failures caused by car crash or drop is done by Johnson-Cook damage model. Simulations are carried out in different impact directions, and the effects of cylinder internal pressure and collision velocity are investigated. The results of different cases show that the maximum damage created in vertical impact and by changing direction from vertical to horizontal resultant damage will be decreased.*

Key Words CNG storage cylinder, collision, Fracture, Damage Mechanics.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۲/٤ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۷/۲۲ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

مقدمه

گاز طبیعی سوختی مقرون به صرفه، کم هزینه با منابع فراوان و با آلودگی‌های احتراق کم‌تر نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی رایج است. یکی از مسایل مهم هنگام استفاده از سوخت گاز طبیعی در صنایع هوایی و خودرو ذخیره‌سازی سوخت است. مخازن گاز طبیعی تحت فشار (CNG)، برای ذخیره‌سازی سوخت در فشار بالا و در تجهیزاتی با سوخت گاز طبیعی فشرده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مخازن CNG با مواد مختلفی ساخته می‌شوند که مخازن فولادی، بیش‌ترین کاربرد را در مخازن دارد. مخازن تمام فلزی نسبت به سایر مخازن، تکنولوژی به‌مراتب شناخته شده‌تری دارند و از قابلیت اعتماد بیش‌تری برخوردار هستند. ایمنی از مهم‌ترین مباحث در طراحی و تولید مخازن CNG است. با توجه به اهمیت حفظ ایمنی و کاهش نگرانی سرنشینان وسایل نقلیه‌ی گازسوز به‌دلیل حوادث ناشی از برخورد مخزن CNG با موانع به‌ویژه در اثر سوانح و تصادفات، لازم است شرایط برخورد مخازن قبل از به‌کارگیری مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به جایگاه روش‌های عددی به‌ویژه روش اجزای محدود در پژوهش‌های اخیر، برای کاهش هزینه‌ها و جلوگیری خطرات آزمون‌های تجربی مخازن، به‌کارگیری این روش در حل مسایلی نظیر تصادم اجتناب‌ناپذیر است.

بکر و همکاران [1] در سال ۱۹۹۱ برای اطمینان از حمل و نقل ایمن مخزن تحت فشار یک راکتور، تعدادی آزمایش سقوط مخزن از ارتفاع‌های متفاوت را ترتیب دادند و نتایج خود را با شبیه‌سازی در نرم‌افزار DYNA مقایسه نمودند. آن‌ها بررسی گسترده‌ای بر روی آزمون محک سقوط آزاد مخزن چند لایه‌ی راکتور انجام دادند. اولسن و نولن [2] در سال ۱۹۹۳ یک سری آزمایش‌های برخورد با سرعت بالا روی مخازن تحت فشار آلومینیومی ترتیب دادند، نتایج آن‌ها نشان می‌داد یک آستانه محدود بین سوراخ شدن و شکست در مخزن برای پیکربندی ایجاد شده و شرایط برخورد وجود دارد. روزنبرگ و همکاران [3] در سال ۱۹۹٤ به‌منظور محاسبه‌ی فشار بحرانی و اندازه‌ی ترک‌ها برای ایجاد زوال روی مخازن تحت فشار فولادی در اثر اصابت گلوله تعدادی آزمایش انجام دادند و طبق محاسبات انجام‌شده بر پایه‌ی دینامیک گازها نتیجه گرفتند که مقدار خروج گاز از سیلندر در برخورد با توجه به ناچیز بودن زمان حادثه قابل چشم‌پوشی است و فرض فشار ثابت درون مخزن هنگام برخورد قابل قبول است. آن‌ها نشان دادند تمرکز تنش ایجاد شده در اثر ترک‌های ناشی از شکل‌گیری حفره‌ها هنگام برخورد گلوله افزایش تنش‌ها را به‌دنبال دارد و احتمال متلاشی شدن مخزن افزایش می‌یابد. فاسانلا و همکارن [4] در سال ۱۹۹۹ برای بررسی اثر برخورد بر مخزن سوخت جانمایی شده در کف هواپیمای بویینگ و هم‌چنین تأثیر محل مخزن به‌عنوان کاهنده ضربه، قسمتی از بدنه هواپیما را در آزمون سقوط آزاد قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد جانمایی مخزن، کاهش صدمات ناشی از برخورد را به‌همراه دارد.

هیرمایر و اسشیفر [5] در سال ۱۹۹۹ به شبیه‌سازی عددی برهم کنش بین تکه‌های جدا شده از مخزن و گاز داخل مخزن هنگام برخورد گلوله به آن در نرم‌افزار AUTODYN-2D پرداختند و همراه با آزمایش‌های تجربی نشان دادند که نیروی درگ آئرودینامیکی سرعت شعاعی و محوری توده‌ی ذرات جدا شده از مخزن در اثر ضربه را به شدت کاهش می دهد و ذرات میخ‌شکلی در فشارهای داخلی بالا درون محفظه شکل می‌گیرد. تلیتچف و همکاران [6] در سال ۱۹۹۹ به تحلیل سازوکار برخورد گلوله به دیواره‌ی مخزن تحت فشار با استفاده از آزمایش‌های انجام شده روی مخازن تحت فشار آلومینیومی پرداختند. در این تحقیق سازوکار فیزیکی حاکم بر فرآیند برخورد گلوله به مخازن تحت فشار به‌صورت مراحل زیر معرفی شد:

الف) سوراخ کردن دیواره‌ی جلویی مخزن، گسترش و تولید موج شوک گاز، ب) رشد و میرایی موج شوک گاز در حرکت به سمت دیواره‌ی پشتی، ج) برخورد موج شوک گاز به دیواره‌ی پشتی و عکس‌العمل آن، د) رشد موج شوک گاز به‌سمت دیواره‌ی جلویی و برهم‌کنش بین موج ارسالی و دیواره. صحت و اعتبار این تحلیل توسط شبیه‌سازی نتایج آزمایشگاهی اثبات شد.

ماهه و همکاران [7] در سال ۲۰۰۱ برای تحلیل بدنه‌ی هواپیمایی از مواد مرکب، تعدادی آزمایش تجربی سقوط آزاد انجام دادند و نقش مؤثر کف هواپیما را در جذب انرژی و کاهش صدمات ناشی از برخورد را به اجزای هواپیما از جمله مخازن مورد برسی قرار دادند. ناگل و تامبیراتنام [8] در سال ۲۰۰۶ به تحلیل مقاطع جدار نازک مخروطی در برخورد مایل با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد نیروی متوسط و جذب انرژی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای با افزایش زاویه‌ی برخورد کاهش می‌یابد. علاوه بر این مخروطی شدن مقطع مستطیلی توانایی جذب انرژی تحت بارگذاری مایل را افزایش می‌دهد. شیرای و ساگوسا [9] در سال ۲۰۰۸ به‌صورت تجربی و عددی در نرم‌افزار LS-DYNA به بررسی رفتار مخزن فولادی در برخورد افقی و عمودی پرداختند و رفتار سازه‌ای این مخازن را در برخورد مورد بررسی قرار دادند. زانگ و یو [10] در سال ۲۰۰۹ با انجام آزمایش‌های متعدد توانایی جذب انرژی مقاطع جدارنازک دارای فشار داخلی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند با افزایش فشار داخلی حالت تغییرشکل از شکل چهارضلعی با گوشه‌های تیز به چهار ضلعی با گوشه‌های گرد تبدیل می‌شود و سرانجام به حالت حلقه‌ای تغییر می‌یابد. در حالت چهار ضلعی نیروی متوسط لوله به‌صورت خطی با فشار داخلی افزایش می‌یابد. لی و همکاران [11] در سال ۲۰۱۰ یک مخزن جدار نازک را برای پیش‌بینی چگونگی تغییرشکل و نرخ تغییرشکل ناشی از بارگذاری فشاری محوری به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. به‌کمک سقوط آزاد اجسام و ثبت لحظه‌های برخورد، چگونگی تغییرشکل ناشی از برخورد را در مخازن جدار نازک با هندسه، مواد و بارگذاری‌های متفاوت به‌دست آوردند. اخیراً ژانگ و همکاران [12] تصادم یک مخزن CNG ساخته شده از مواد مرکب را به‌روش تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان با اندازه‌گیری آسیب در سرعت‌های مختلف تصادم، ناحیه‌ی ایمن را برای مخزن معرفی نموده‌اند.

پیشینه‌ی پژوهش نشان می‌دهد تحقیقات محدودی در زمینه‌ی تصادم و یا برخورد مخازن CNG انجام گرفته است. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر فشار داخل مخزن، سرعت برخورد و امتداد برخورد بر مقدار آسیب وارد بر مخازن CNG است. برای این منظور در این پژوهش، ابتدا به معرفی مدل آسیب جانسون-کوک که برای تخمین آسیب وارد هنگام برخورد مورد استفاده قرار می‌گیرد پرداخته می‌شود. سپس تصادم افقی و عمودی مخزن برای حالت‌های مختلف فشار داخلی و سرعت برخورد به‌روش اجزای محدود شبیه‌سازی می‌گردد. تصادم افقی در این تحقیق برخورد قسمت استوانه‌ای سیلندر با مانع و تصادم عمودی برخورد از طرف عدسی‌های دو طرف مخزن تعریف می‌شود. به‌کمک نتایج شبیه‌سازی، آسیب ناشی از برخورد برای حالت‌های مختلف تصادم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مدل آسیب جانسون-کوک

امروزه مدل‌های مکانیک آسیب جانشینی مناسب برای روش‌های مکانیک شکست سنتی به‌شمار می‌آیند. دیدگاه‌های آسیب بر پایه‌ی نظریه‌ی شکست نرم برای به‌کارگیری در مسایل برخورد با سرعت بالا دارای

کاربرد فراوانی هستند. در مدل‌های متداول آسیب بر مبنای شکست نرم، با در نظر گرفتن تنش سه‌محوره (نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش معادل فون میزز)، کرنش پلاستیک معادل و نرخ کرنش می‌تواند الگوهای واقعی شکست را به‌خوبی پیش‌بینی کند. جانسون و کوک [16] در سال ۱۹۸۵ یک مدل آسیب برای پیش‌بینی شکست در مواد نرم را معرفی نمودند. با توجه به کارآیی و دامنه کاربرد آن امروزه این مدل در نرم‌افزارهای اجزای محدود پیاده‌سازی شده است. در این مدل کرنش شکست ماده به‌صورت تابعی از تنش سه‌محوره، نرخ کرنش و دما در نظر گرفته می‌شود. مقایسه‌ی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد مدل جانسون-کوک در پیش‌بینی مسایل برخورد با سرعت بالا یک مدل کارآ است. مزیت استفاده از روش‌های مکانیک آسیب از جمله مدل آسیب جانسون-کوک استقلال مدل از هندسه مسأله است. در این تحقیق از مدل آسیب جانسون-کوک برای پیش‌بینی شکست حاصل از برخورد استفاده شده است.

جانسون و کوک در ابتدا یک مدل ساختاری برای توصیف رفتار ماده تحت بارگذاری دینامیکی ارائه کردند که سطح تسلیم فون میزز همراه با قانون جریان وابسته به آن در این مدل به کار گرفته شده است [14]. در ادامه آن‌ها همراه با مدل ساختاری ماده یک معیار شکست را برای مسایل شکست دینامیکی معرفی کردند [15]. در مدل آسیب جانسون - کوک کرنش شکست تابعی از تنش سه‌محوره، نرخ کرنش و دما است. مدل ساختاری و کرنش شکست مدل جانسون-کوک به‌ترتیب به‌صورت زیر بیان می‌شود [14,15]:

$$\bar{\sigma}=\left[A+B\varepsilon_{pl}^{n}\right]\left[1+C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1-\left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^{q}\right] \quad (۱)$$

$$\varepsilon_f=\left[D_1+D_2\exp\left(D_3\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}}\right)\right]\left[1+D_4\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1+D_5\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right] \quad (۲)$$

$\bar{\sigma}$ تنش فون میزز، σ_h تنش هیدرواستاتیک، ε_{pl} کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\varepsilon}_{pl}$ و $\dot{\varepsilon}_0$ به‌ترتیب نرخ کرنش پلاستیک واقعی و نرخ کرنش مرجع، T دما، T_0 دمای محیط، T_m دمای ذوب ماده و A، B، C، n، q و D_1 تا D_5 ثابت‌های ماده هستند. این مدل کرنش سختی همسانگرد، نرخ کرنش سختی و نرم‌شدگی ناشی از افزایش دما را در رفتار ماده لحاظ می‌کند. کرنش شکست با افزایش تنش سه‌محوره کاهش می‌یابد. تنش سه‌محوره هنگام فرآیند بارگذاری تغییر می‌کند [16]. بررسی‌های تئوری و آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهند فشار هیدرواستاتیک تأثیر زیادی روی کرنش شکست دارد؛ ولی جریان پلاستیک را تغییر نمی‌دهد [13].

در این مدل، آسیب به‌صورت زیر رشد می‌کند [15]:

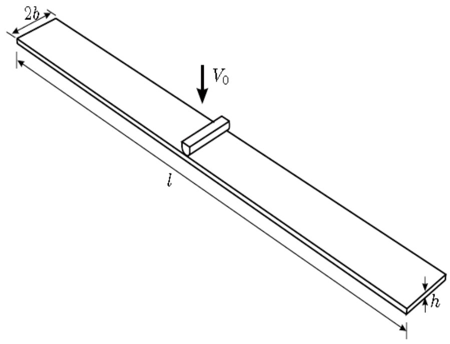
$$D=\int_0^{\varepsilon_{pl}}\frac{1}{\varepsilon_f}\,d\varepsilon_{pl} \quad (۳)$$

با رسیدن D به مقدار یک، شکست در ماده اتفاق می‌افتد. مدل جانسون-کوک توسط آزمایش‌های کششی روی میله‌ی استوانه‌ای و فاق‌دار، و یا به‌صورت ترکیبی با شبیه‌سازی‌های اجزای محدود کالیبره می‌شود.

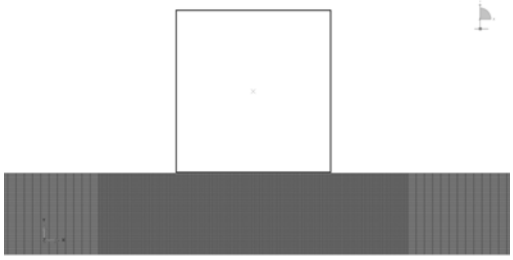
راستی‌آزمایی مدل آسیب جانسون-کوک

یکی از مسأله‌های مهم و کاربردی در حوزه‌ی مکانیک ضربه که برای راستی‌آزمایی معیارهای شکست استفاده می‌شود، آزمون برخورد پرتابه صلب به صفحه است. در آزمون برخورد پرتابه‌ی صلب به صفحه؛ صفحه‌ی هدف ثابت و پرتابه‌ی صلب با سرعت بالایی به صفحه برخورد می‌کند. در این بخش برای نشان دادن راستی‌آزمایی مدل آسیب جانسون-کوک این برخورد شبیه‌سازی می‌شود و نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهش‌های موجود مقایسه می‌گردد. صفحه‌ی با مقطع مستطیل مطابق شکل (۱) که مورد هدف یک پرتابه‌ی

صلب دارای دماغه‌ی گرد و تخت قرار می‌گیرد را در نظر بگیرید. طول صفحه، l، ۱۰۰۰ میلی‌متر، عرض صفحه، 2b، ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۰ میلی‌متر است. مدل‌سازی فرآیند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شده است. با توجه به بزرگی قابل توجه عرض صفحه نسبت به ضخامت آن، از مدل دوبعدی برای کاهش زمان محاسبات می‌توان سود برد. برای شبکه‌ی اجزای محدود صفحه‌ی هدف از المان ٤ گرهی کرنش صفحه‌ای (CPE4R) استفاده می‌شود.



شکل ۱ تصویر شماتیک برخورد پرتابه صلب به صفحه‌ی تغییرشکل‌پذیر [16]



شکل ۲ مدل اجزا محدود برخورد پرتابه با دماغه تخت به صفحه‌ی هدف

پرتابه به‌صورت جسم صلب در نظرگرفته شده است و قید تماس سخت که به پرتابه اجازه می‌دهد از صفحه‌ی هدف منعکس شود، در سطح برخورد به کار رفته است. به‌طور هم‌زمان برهم‌کنش جسم صلب و صفحه‌ی تحت برخورد بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است [16]. در ناحیه‌ی ضربه از المان‌های با ابعاد ۰/۲ میلی‌متر استفاده شده است و المان‌های با ابعد بزرگ‌تر در نواحی دورتر به کار رفته است. شکل (۲) مدل اجزای محدود این آزمون را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی تشکیل ترک‌ها از روش حذف المان استفاده شده است. برای این هدف، پس از رسیدن مقدار آسیب به آسیب بحرانی از دستور "deletion element" نرم‌افزار برای حذف المان‌ها سود برده شده است. شرط مرزی گیردار با حذف تمام درجات آزادی برای دو انتهای صفحه‌ی تحت برخورد به‌کار رفته است. صفحه به اندازه‌ی کافی بلند است تا در سرعت برخوردی که به اندازه‌ی کافی بیش‌تر از سرعت حدی پرتابه باشد، قبل از این‌که موج‌های تنش پلاستیک در پهنا به انتهای مسیر برسند دچار شکست شود. سرعت حدی پرتابه عبارت است از سرعت مورد نیاز برای پرتابه‌ی خاص تا به‌طور کامل در قسمتی از یک هدف خاص نفوذ و آن را سوراخ کند؛ به‌عبارت دیگر اگر سرعت پرتابه‌ی مورد نظر کم‌تر از سرعت حد باشد نمی‌تواند در هدف نفوذ کامل نماید. مدل ساختاری ماده جانسون - کوک برای محاسبات مربوط به ماده و هم‌چنین آسیب جانسون - کوک برای پیش‌بینی شکست به‌کار رفته است و شرایط مدل‌سازی برای به‌دست آمدن پاسخ‌های هرچه دقیق‌تر از مرجع [16] اقتباس شده است. ضرایب ماده در مدل آسیب جانسون - کوک برای آلومینیوم آلیاژ ٢٠٢٤-T351 مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است [16]. ضرایب A، B و n در مدل ماده جانسون-کوک مربوط به تسلیم و سخت‌شوندگی ماده هستند که از منحنی تنش-کرنش استاتیکی استخراج می‌شوند. ضریب نرخ کرنش، C، از تنش تسلیم منحنی‌های تنش-کرنش در نرخ کرنش‌های مختلف به‌دست می‌آید. ضرایب D_1، D_2 و D_3 در مدل ماده آسیب جانسون-کوک از آزمون‌های کشش ساده بر روی نمونه‌هایی با تنش سه‌محوره معین استخراج می‌گردد. ضریب D_4، از آزمون کشش ساده در نرخ کرنش‌های مختلف و ضریب D_5، از آزمون کشش ساده در دماهای مختلف به‌دست می‌آیند.

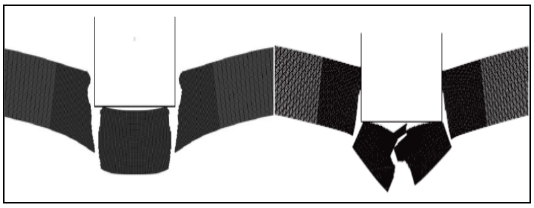
جدول ۱ ضرایب ماده برای آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 [16]

E (GPa)	ν	ρ (kg/m³)	T_m (K)	T_0 (K)	C_v (J/kg.K)
٧٤/٦٦	٠/٣٠	٢٧٠٠	٧٧٥	٢٩٣	٨٧٥
α (K⁻¹)	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
٠/٠٠٠٠٢٣	٣٥٢	٤٤٠	٠/٤٢	٠/٠٠٨٣	١/٠٠
$\dot{\varepsilon}_0$ (s^{-1})	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
٠/٠٠٠٣٣٣	٠/١٣	٠/١٣	−١/٥٠	٠/٠١١	٠/٠

شکل (۳) فرآیند قاچ‌خوردگی برشی صفحه از جنس آلومینیوم آلیاژ 2024-T351 را توسط پرتابه با دماغه‌ی تخت که در سرعت ٢٤٠ متر بر ثانیه پرتاب شده است را نشان می‌دهد، آشکار است ناحیه‌ای از صفحه که تحت برخورد با پرتابه قرار دارد، به‌طور عمیقی فرو می‌رود و تغییرشکل پلاستیک بزرگی را متحمل می‌شود. هم‌زمان با فرو رفتن ناحیه‌ی برخورد توسط پرتابه، تمرکز تنش در اطراف گوشه‌های تیز پرتابه ایجاد می‌شود و المان‌های این ناحیه به‌علت برش دچار زوال می‌شوند. دو ترک اصلی در سطح مقابل صفحه‌ی تحت برخورد ایجاد می‌شوند و به‌سرعت در راستای ضخامت همراه با حرکت پرتابه گسترش می‌یابند و در نهایت قاچ‌خوردگی برشی به‌وجود آمده و تکه‌ی وسط از صفحه جدا می‌شود. این فرآیند زوال توسط فرورفتگی ناحیه برخورد و رشد سراسری ترک در راستای ضخامت توصیف می‌شود [16]. تفاوت الگوی شکل شکست را می‌توان به مدل مورد استفاده برای مدل‌سازی شکست و تفاوت شبکه و روش حل اجزای محدود نسبت داد.

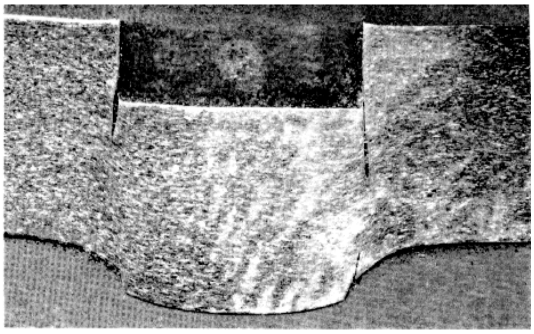
شکل نهایی شکست حاصل از شبیه‌سازی تحقیق حاضر در مقایسه با نتایج مرجع [16] به حالت واقعی شکست نزدیک‌تر است. شکل (٤) سطح مقطع ورق آلومینیومی در آزمایش تجربی انجام شده توسط مسکال [19] که در آن ورق در اثر اصابت پرتابه فولادی در سرعت ٢٤٥ متر بر ثانیه قرار گرفته است را نشان می‌دهد. دو ترک سراسری در اثر تصادم پرتابه ایجاد شده و قسمت قاچ خوردگی دارای ضخامت تقریباً یکسانی در مقایسه با نواحی اطراف است.

مقایسه‌ی شکل‌های (۳ و ٤) نشان می‌دهد ناحیه‌ی زوال‌یافته در شبیه‌سازی به‌صورت کیفی با آزمایش تجربی تطابق دارد.



(ب)   (الف)

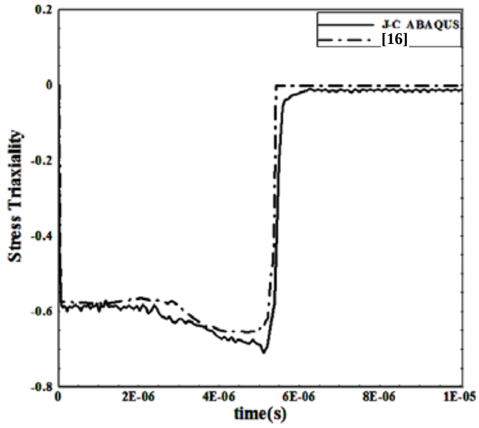
شکل ۳ مقایسه‌ی برخورد پرتابه‌ی تخت با صفحه آلومینیوم 2024-T351 در سرعت ٢٤٠ m/s، الف) [16] و ب) شبیه‌سازی تحقیق حاضر



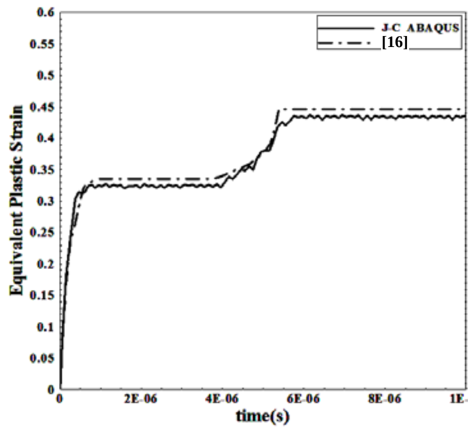
شکل ٤ الگوی زوال در برخورد پرتابه‌ی فولادی با ورق آلومینیوم [19]

شکل (٥) نشان می‌دهد مقدار تنش سه‌محوری برای مدل‌سازی اخیر در طول فرآیند برخورد حدود ٠/٦– است.

با توجه به شکل (٦) مقدار کرنش پلاستیک معادل ابتدا به سرعت افزایش یافته و به مقدار پایدار حدود ٠/٣٣ می‌رسد و در ادامه رشد می‌کند و در پایان به مقدار تقریبی ٠/٤٢ می‌رسد. ناحیه‌ی برخورد تغییر شکل پلاستیک فشاری بزرگی را متحمل شده است. مقدار دوکمیت مذکور پس از گذشت حدود ٦ میکرو ثانیه به مقدار ثابتی می‌رسد که نشان دهنده‌ی زوال المان مربوط به نقطه‌ی مورد نظر است. همان‌طور که شکل‌های (٥ و ٦) نشان می‌دهد نمودارهای به‌دست آمده هم‌خوانی خوبی با نتایج مرجع [19] دارد.



شکل ۵ تاریخچه‌ی تنش سه محوری برای نقطه‌ی شروع ترک صفحه‌ی آلومینیومی تحت برخورد



شکل ٦ تاریخچه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای نقطه‌ی شروع ترک صفحه‌ی آلومینیومی تحت برخورد

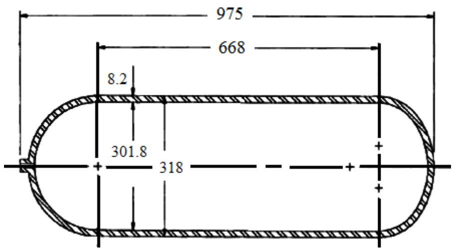
شبیه‌سازی تصادم در مخزن CNG

در این بخش مدل‌سازی و تحلیل مخزن CNG هنگام تصادم به‌روش اجزای محدود صریح پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها تبیین می‌گردد. در روش اجزای محدود صریح، حل مسأله به‌صورت گام‌به‌گام و از مرزها شروع و به‌پیش می‌رود. در این روش ابعاد ماتریس‌های سختی بزرگ نخواهد بود و همگرایی حل در مسایل پیچیده از جمله پدیده‌های دینامیکی با سرعت بالا، مسایلی با تعدد سطوح تماس و هم‌چنین پدیده‌ی شکست؛ نسبت به روش اجزای محدود ضمنی بیش‌تر خواهد بود. در این تحقیق، از روش صریح اجزای محدود برای پیاده‌سازی مدل آسیب جانسون-کوک در برخورد مخزن سود برده شده است.

مدل‌سازی مخزن CNG. مخزن CNG با حجم ٦۰ لیتر با ابعاد هندسی معین برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است (شکل۷). جنس مخزن آلیاژ فولادی 4340 و ضرایب ماده برای مدل آسیب جانسون-کوک در جدول (۱) آمده است [15]. این مخزن CNG، با ابعاد مورد تحلیل در این مقاله، قابلیت نصب بر روی تمامی خودروهای سبک که در داخل کشور تولید می‌شوند را دارد. در جدول (۲)، E، مدول الاستیسیته، ν، ضریب پواسون، ρ، چگالی، C_v، گرمای ویژه، α ضریب انبساط طولی است.

تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و در محیط ABAQUS\Explicit برای حالت تصادم در امتدادهای افقی و عمودی صورت گرفته است.

در این پژوهش از استاندارد سازمان توسعه‌ی استاندارد کانادا، CSA، در مخازن CNG –که یکی از استانداردهای معتبر در مخازن CNG است- برای بررسی آسیب وارد به مخزن و قابلیت به‌کارگیری آن پس از برخورد سود برده می‌شود.



شکل ۷ ابعاد هندسی مخزن فولادی CNG بر حسب میلی‌متر [18]

جدول ۲ ضرایب ماده برای فولاد آلیاژ 4340 [15]

E (GPa)	ν	$(kg/m^3)\rho$	T_m (K)	T_0 (K)	C_v (J/kg.K)
۲۰۰	۰/۲۹	۷۸۳۰	۱۷۹۳	۲۹۳	٤۷۷
α (K^{-1})	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
۰/۰۰۰۰۳۲	۷۹۲	۵۱۰	۰/۲٦	۰/۰۱٤	۱/۰۳
$\dot{\varepsilon}_0$ (s^{-1})	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
۱	۰/۰۵	۳/٤٤	−۲/۱۲	۰/۰۰۲	۰/٦۱

دستورالعمل‌های عمومی مؤسسه‌ی CSA در بازرسی مخازن خودروهای گازسوز آسیب‌های وارد بر مخازن CNG را به سه گروه تقسیم‌بندی می‌کند [17]:

الف- گروه اول: این گروه از آسیب‌ها قابل قبول است و مخزن نیازی به تعمیر یا تعویض ندارد. هر خراش یا سوراخی که به‌دلیل حوادث مختلف در مخزن ایجاد شود، عمق آسیب حاصل کم‌تر یا برابر ۰/۰۱۰ اینچ (تقریبا معادل ۰/۲۵ میلی‌متر) باشد، در این دسته قرار می‌گیرد.

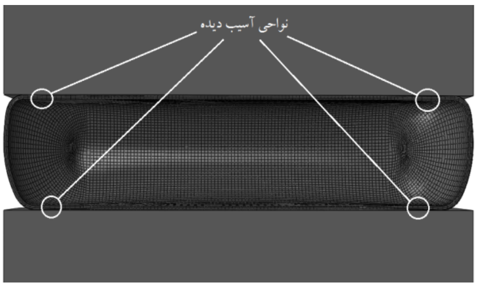
ب- گروه دوم: آسیب‌هایی هستند که باید برای ترمیم آن‌ها مخزن تحت تعمیر قرار گیرد تا قابلیت استفاده‌ی مجدد را داشته باشد. هر خراش ناشی از حادثه که در مخزن ایجاد شود و عمق آسیب حاصل بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۵۰ اینچ (معادل تقریبی ۰/۲۷ تا ۱/۲۷ میلی‌متر) باشد در این گروه قرار می‌گیرد.

پ- گروه سوم: آسیب‌هایی هستند که مخزن غیرقابل استفاده می‌شود و باید با مخزن جدید جایگزین گردد. خراشی که در مخزن عمق آسیب ۰/۰۵۰ اینچ (تقریباً ۱/۲۷ میلی‌متر) ایجاد کند در این گروه جای می‌گیرد.

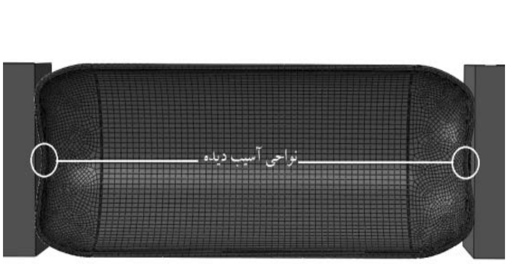
با توجه به الزامات موجود در استاندارد CSA از شبکه‌ی اجزای محدود با چگالی بیش‌تر تا عمق ۱/۲۷ میلی‌متر در سطح بیرونی دیواره‌ی مخزن استفاده شد و برای قسمت‌های با عمق بیش‌تر از شبکه با چگالی کم‌تر بهره برده شد. شبکه‌ی انتخاب شده باعث کاهش زمان حل و در صورتی که عمق آسیب تا ضخامت۱/۲۷ میلی‌متر از سطح بیرونی رشد کند، نیازی به شبکه‌بندی مجدد در ضخامت نیست. از طرف دیگر، در مدل‌سازی مخزن به‌منظور تسریع حل، نواحی که به‌صورت مستقیم در معرض ضربه قرار دارد، دارای شبکه‌ی با چگالی بیش‌تر نسبت به سایر نواحی است. سازه‌ی مخزن به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی می‌گردد از این‌رو، قسمت میانی و دو عدسی ابتدا و انتها به‌عنوان یک جسم در تحلیل‌ها آمده‌اند. در مدل مخزن از المان‌های آجری خطی هشت گرهی با نقاط انتگرال کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده است. از آن‌جا که ضریب اصطکاک به جنس و کیفیت سطوح تماس اجسام وابسته است و در تحلیل برخورد مخزن کیفیت سطوح تماس به‌ویژه مانع مشخص نیست، از این‌رو ضریب اصطکاک متعارف برای سطوح فلزات یعنی ۰/۱ منظور شده است. در مدل‌های مختلف تصادم که ناحیه‌ی خارجی جداره‌ی مخزن تا عمق ۱/۲۷ میلی‌متر (مقدار بیشینه‌ی عمق آسیب دیدگی) دارای پنج گره باشد برای تصادم عمودی مخزن، ۵۱۰۶۰ گره و ۴۲۸۱۴ المان و برای تصادم افقی مخزن ۸۶۴۰۳ گره و ۷۵۷۱۵ المان به کار رفته است. در حالتی که ۱۰ گره تا عمق ۱/۲۷ میلی‌متر ایجاد شده است، برای تصادم عمودی مخزن، ۱۰۹۰۲۱ گره و ۹۶۸۶۹ المان و *برای* تصادم افقی مخزن ۱۵۴۵۶۳ گره و ۱۴۱۴۹۵ المان استفاده شده است. برای رشد ناشی از برخورد آسیب در نواحی آسیب‌دیده در سطح مخزن از روش حذف المان کمک گرفته شده است. معادله‌ی حاکم ماده و مدل آسیب جانسون-کوک برای پیش‌بینی شکست مخزن به‌کار رفته است. مدت زمان فرآیند برخورد در شبیه‌سازی‌ها ۲۰ میلی‌ثانیه در نظرگرفته شده است. این زمان برابر با زمان برخورد تا جدایی مخزن از سطح صلب در آزمون سقوط آزاد است. برای حالت‌های مختلف برخورد علاوه بر نمودار رشد آسیب نمودارهای کرنش پلاستیک معادل و تنش سه‌محوره که پارامترهای مؤثر در رشد آسیب هستند، مورد بررسی قرار گرفته است.

برای بررسی مقدار آسیب وارد بر مخزن CNG حالت‌های اصلی مخزن در تصادم، یعنی تصادم عمودی و افقی با امتدادهای مختلف برخورد مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. به‌دلیل وجود تقارن در مخزن تنها یک‌دوم مخزن مدل‌سازی شده است. شکل‌های (۹ و ۸) مدل‌های اجزای محدود مخزن CNG را بین دو سطح صلب مکعب‌مستطیل‌شکل نشان می‌دهد. یکی

از این سطوح به‌عنوان تکیه‌گاه مخزن هنگام تصادم بوده و درجات آزادی این جسم صلب مقید شده است. جسم دیگر، جسم برخورد کننده در نظر گرفته شده و سرعت برخورد مورد نظر به آن اختصاص یافته است. برای استفاده‌ی ایمن از نتایج شبیه‌سازی‌های برخورد، موانع و تکیه‌گاه‌های مخزن هنگام برخورد به‌صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند، تا مقدار آسیب به مخزن به حداکثر مقدار خود برسد. برای بررسی تأثیر فشار داخلی مخزن و سرعت برخورد مانع بر روی مقدار آسیب وارد بر مخزن برای هر یک از امتدادهای شبیه‌سازی تصادم، فشار مخزن برابر با ۲۰۰ bar (فشار کاری مخزن) و ۵۰ bar به‌صورت یکنواخت به سطح داخلی مخزن و سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت، سرعت بحرانی، و ۱۲۰ کیلومتر در ساعت، حداکثر سرعت مجاز در بزرگراه، به جسم صلب برخورد کننده، اعمال شده است. سطوحی از مخزن که هنگام تصادم در تماس با جسم صلب قرار می‌گیرند دارای بیش‌ترین کرنش پلاستیک هستند و از نظر فیزیکی مستعد بروز آسیب در مخزن هستند (شکل ۹ و ۸).



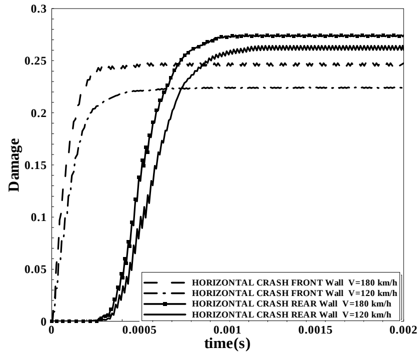
شکل ۸ مدل تغییرشکل یافته‌ی مخزن پس از تصادم افقی برخورد در فشار کاری مخزن و سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت



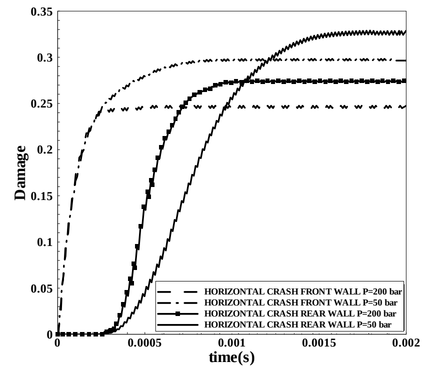
شکل ۹ مدل تغییرشکل یافته‌ی مخزن پس از تصادم عمودی در فشار کاری مخزن و سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت

تصادم افقی مخزن CNG. در سوانح و تصادفات جاده‌ای، مخزن CNG خودرو در جهت‌های مختلف دچار ضربه و آسیب می‌شود. از این‌رو، در این پژوهش مخزن در دو جهت افقی و عمودی در شرایط ضربه قرار می‌گیرد و آسیب‌های وارد به آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور مخزن به‌صورت افقی در شرایط مختلف، سرعت و فشار داخلی متفاوت به مانع برخورد می‌کند و مقدار آسیب وارد بر آن و کمیت‌های مرتبط با آن در نقاط بحرانی مخزن و نواحی زوال یافته برآورد می‌گردد (شکل ۸). شکل (۱۰) منحنی رشد آسیب (معرفی شده در رابطه‌ی ۳) در فشار کاری مخزن و در سرعت‌های مختلف برخورد برای نواحی آسیب‌دیده برای دیواره‌ی مقابل مخزن (قسمتی از مخزن که به جسم صلب برخورد می‌کند) و دیواره پشت مخزن (ناحیه روبروی قسمت برخورد) ترسیم شده است. منحنی رشد آسیب برای سرعت ۱۸۰ Km/h و در فشارهای مختلف برای نواحی آسیب‌دیده در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مقدار آسیب انباشته شده در ناحیه‌ی آسیب‌دیده‌ی دیواره‌ی پشتی مخزن در تمام حالت‌ها بیش از مقدار آسیب در دیواره‌ی مقابل است. مقدار آسیب در حالت‌های مختلف برخورد به‌سرعت رشد می‌کند و پس از مدت کوتاهی به مقدار ثابتی می‌رسد. رشد آسیب در دیواره‌ی پشتی با تأخیر آغاز می‌شود و شیب کم‌تری نسبت به دیواره‌ی مقابل دارد؛ ولی در نهایت مقدار بیش‌تری را کسب می‌کند. دلیل تأخیر در شروع انباشتگی آسیب در دیواره‌ی پشتی مدت زمان لازم برای رشد و انتقال موج تنش ایجاد شده در اثر ضربه از دیواره‌ی مقابل مخزن است. شکل‌های (۱۱ و ۱۰) نشان می‌دهند در فشار کم‌تر و سرعت برخورد بیش‌تر، مقدار آسیب انباشته شده برای هر دو امتداد بیش‌تر است. برای حالت فشار ثابت، کم‌ترین مقدار آسیب انباشته شده در دیواره‌ی مقابل برای سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت تقریباً برابر با حدود ۰/۲۲ و

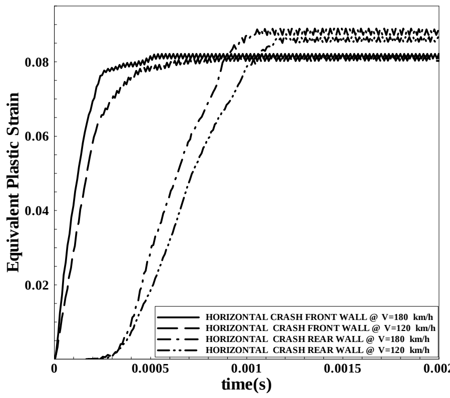
بیش‌ترین مقدار آسیب در دیواره‌ی پشتی برای سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت تقریباً برابر با ۰/۲۷ است. برای حالت سرعت ثابت کم‌ترین مقدار آسیب انباشته شده در دیواره‌ی مقابل و فشار ۲۰۰ bar حدود ۰/۲۴ و بیش‌ترین مقدار در دیواره‌ی پشتی و در فشار ۵۰ bar حدود ۰/۳۳ است. کرنش پلاستیک معادل از الگوی رشد آسیب مشابهی پیروی می‌کند (شکل‌های ۱۳ و ۱۲). به‌عبارت دیگر، تأثیر کرنش پلاستیک در رشد آسیب محسوس‌تر از تأثیر تنش سه‌محوره است. کرنش پلاستیک معادل پس از مدت کوتاهی با رشد سریع به مقدار ثابتی می‌رسد. رشد این کمیت در دیواره‌ی پشتی با تأخیر شروع می‌شود و با شیب کم‌تری نسبت به دیواره‌ی مقابل رشد می‌کند و در انتها مقدار بیش‌تری را کسب می‌کند.



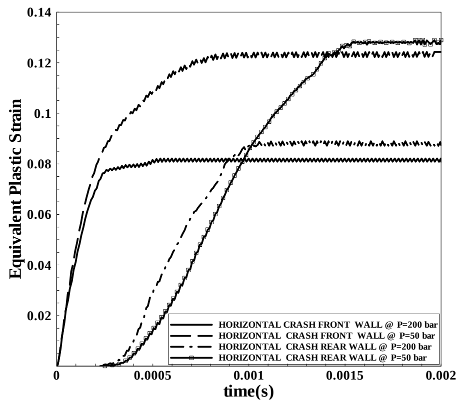
شکل ۱۰ رشد آسیب برای نقطه‌ای در ناحیه‌ی آسیب‌دیده‌ی تصادم افقی در فشارکاری مخزن و سرعت‌های متفاوت



شکل ۱۱ رشد آسیب برای نقطه‌ای در ناحیه‌ی آسیب‌دیده تصادم افقی در سرعت ۱۸۰ km/h و فشارهای متفاوت مخزن



شکل ۱۲ تاریخچه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده‌ی تصادم افقی در فشارکاری مخزن و سرعت‌های متفاوت



شکل ۱۳ تاریخچه کرنش پلاستیک معادل برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده‌ی تصادم افقی در سرعت ۱۸۰ km/h و فشارهای متفاوت مخزن

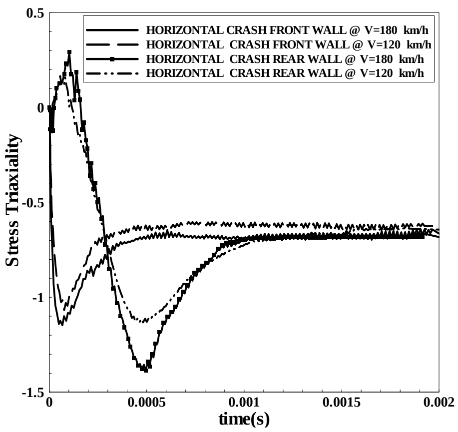
مقایسه‌ی شکل‌های (۱۳-۱۰) نشان می‌دهد آسیب تأثیر بیش‌تری از کرنش پلاستیک می‌پذیرد و کم‌تر از تنش سه‌محوره متأثر می‌شود. کرنش پلاستیک ابتدا صفر است و در ادامه رشد می‌کند و پس از اندک زمانی تقریباً ثابت می‌شود. با توجه به تابعیت آسیب از کرنش پلاستیک و تنش سه‌محوره (مطابق رابطه‌ی ۱ و ۲) آسیب نیز از این الگو تبعیت می‌کند. برای هر دو امتداد تصادم در فشار داخلی کم‌تر و سرعت بالاتر در دیواره‌ی پشتی، کرنش پلاستیک معادل بیش‌تری اتفاق می‌افتد. در حالت فشار ثابت کم‌ترین مقدار کرنش پلاستیک معادل در دیواره‌ی مقابل و سرعت ۱۲۰

کیلومتر در ساعت حدود ۰/۰۸ و بیش‌ترین مقدار در دیواره‌ی پشتی و سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت حدود ۰/۰۹۵ است و برای حالت سرعت ثابت کم‌ترین مقدار کرنش پلاستیک معادل در دیواره‌ی مقابل و فشار bar ۲۰۰ حدود ۰/۰۸ و بیش‌ترین مقدار در دیواره‌ی پشتی و در فشار bar ۵۰ حدود ۰/۱۳ است. مطابق شکل‌های (۱۵ و ۱٤) تنش سه‌محوره، در بیش‌تر از نیمی از زمان برخورد در بازه‌ی ۰/٦- تا ۰/۹- تغییر می‌کند که نشان می‌دهد نواحی آسیب‌دیده در حالت فشار قرار دارد و از طرف دیگر برای شرایط مختلف برخورد از گذشت ۰/۰۰۱۵ ثانیه تقریباً به مقدار ۰/۷- همراه می‌شود.

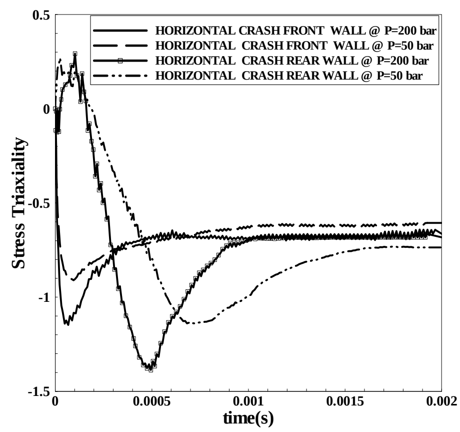
به‌عبارت دیگر، تأثیر تنش سه‌محوره در رشد آسیب برای شرایط مختلف در برخورد تقریباً یکسان است. تنش سه‌محوره مربوط به دیواره‌ی پشتی در ابتدا به‌سرعت رشد می‌کند و پس از آن افت محسوسی دارد و در نهایت پس از یک رشد نسبی به مقدار ثابتی می‌رسد. در دیواره‌ی مقابل از ابتدا افت تنش سه‌محوره اتفاق افتاده و سپس با رشد نسبی به مقدار ثابتی می‌رسد. نمودار تنش سه‌محوره در دیواره‌ی مقابل سریع‌تر از دیواره‌ی پشتی به مقدار ثابتی می‌رسد. افت تنش سه‌محوره در نواحی آسیب‌دیده به‌دلیل فشار ناشی از خمش در جداره‌ی بیرونی دیواره‌ی مخزن به‌وجود می‌آید.

مقدار قدرمطلق تنش سه‌محوره برای دیواره‌ی پشتی بیش‌تر از ناحیه‌ی مقابل است و نشان می‌دهد دیواره‌ی پشتی تحت فشار بیش‌تری است. بیش‌ترین افت تنش سه‌محوره تا مقدار تقریبی ۱/٤- در فشار bar ۲۰۰ و سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت برای المان‌های آسیب‌دیده‌ی بحرانی دیواره‌ی پشتی رخ می‌دهد.

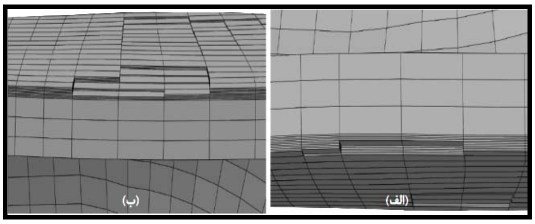
با حذف المان‌های آسیب‌دیده در شکل‌های (۱۸-۱٦) مشاهده می‌شود برای تصادم افقی در فشار bar ۲۰۰ و سرعت‌های مختلف، عمق آسیب‌دیدگی دیواره‌ی مخزن در مقایسه با مقادیر بیان شده در استاندارد CSA بین ۰/۲۷ تا ۱/۲۷ میلی‌متر است و مخزن با تعمیر قابل استفاده‌ی مجدد است. اما در فشار ۵۰bar و سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت عمق آسیب از مقدار مجاز(۱/۲۷ میلی‌متر) فراتر می‌رود و مخزن از کارافتاده تلقی می‌شود. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت در تصادم افقی دیواره‌ی پشتی مخزن آسیب بیش‌تری را در فرآیند برخورد متحمل شده و ناحیه‌ی آسیب‌دیده بحرانی در تصادم افقی محسوب می‌شود.



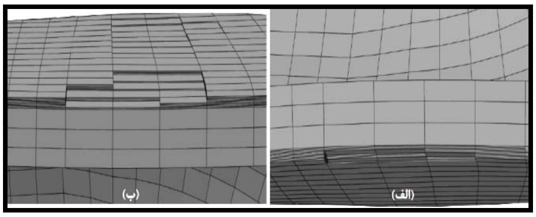
شکل ۱٤ تاریخچه‌ی تنش سه‌محوره برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده‌ی تصادم افقی در فشار کاری مخزن و سرعت‌های متفاوت



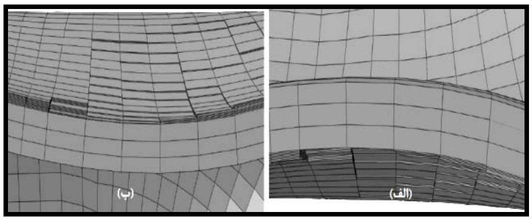
شکل ۱۵ تاریخچه‌ی تنش سه‌محوره برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده‌ی تصادم افقی در سرعت km/h ۱۸۰ و فشارهای متفاوت مخزن



شکل ١٦ نواحی زوال یافته در تصادم افقی برای فشار ٢٠٠ bar و سرعت ١٢٠ km/h، الف–دیواره‌ی مقابل مخزن و ب–دیواره‌ی پشت مخزن



شکل ١٧ نواحی زوال یافته در تصادم افقی برای فشار ٢٠٠ bar و سرعت ١٨٠ km/h، الف– دیواره‌ی مقابل مخزن و ب–دیواره‌ی پشت مخزن

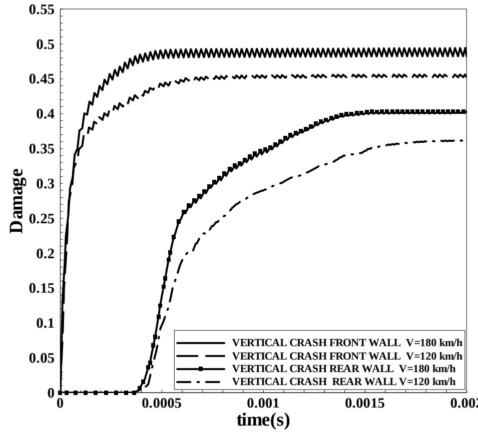


شکل ١٨ نواحی زوال یافته در تصادم افقی برای فشار ٢٠٠ bar و سرعت ١٨٠ km/h، الف–دیواره‌ی مقابل مخزن و ب–دیواره‌ی پشت مخزن

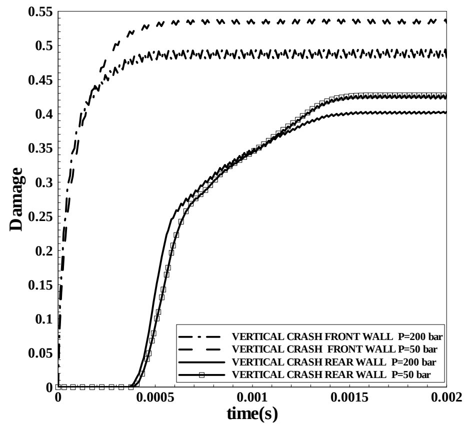
با توجه به آن که در روش اجزای محدود صریح، تحلیل به‌صورت گام‌به‌گام و به‌صورت دینامیکی انجام می‌شود، نتایج تحلیل نظیر منحنی‌های تنش، کرنش پلاستیک و آسیب دارای نوسان خواهند بود (شکل‌های ١٥–١٠). آسیب متأثر از کرنش پلاستیک و تنش سه‌محوره است و همان‌گونه که شکل‌های (١٥–١٢) نشان می‌دهند کرنش پلاستیک و تنش سه‌محوره ابتدا صفر هستند و در ادامه رشد می‌کنند و پس از زمان ٠/٠٠١٢ ثانیه تقریباً ثابت می‌شوند. با توجه به تابعیت آسیب از کرنش پلاستیک و تنش سه‌محوره (مطابق رابطه‌ی ٢ و ١) آسیب نیز از این الگو تبعیت می‌کند.

تصادم عمودی مخزن CNG. در این بخش آسیب‌های وارد بر مخزن و کمیت‌های مرتبط با آن در نقاط بحرانی مخزن و نواحی زوال یافته برای تصادم عمودی مخزن مورد بررسی قرار می‌گیرد. شرایط برخورد برای مخزن در این حالت، مشابه تصادم افقی در نظر گرفته شده است. از این‌رو، مخزن در فشار و سرعت‌های متفاوت تحت تصادم عمودی قرار می‌گیرد. شکل‌های (٢٠ و ١٩) نشان می‌دهد در تصادم عمودی آسیب به‌سرعت رشد می‌کند و پس از مدت کوتاهی به مقدار ثابتی می‌رسد. با مقایسه‌ی شکل‌های (١١ و ١٠) با شکل‌های (٢٠ و ١٩) می‌توان مشاهده نمود مقدار آسیب انباشته شده‌ی نهایی در ناحیه‌ی بحرانی عدسی مقابل در حالت‌های مختلف برخورد بیش‌تر از آسیب در عدسی پشتی مخزن است. در تصادم عمودی مانند تصادم افقی رشد آسیب در قسمت پشتی با تأخیر آغاز می‌شود و دارای شیب رشد کم‌تری است، اما برخلاف حالت قبل مقدار نهایی کم‌تری نسبت به قسمت مقابل مخزن دارد. دلیل تأخیر در شروع انباشتگی آسیب در دیواره‌ی پشتی مدت زمان لازم برای رشد و انتقال موج تنش ایجاد شده در اثر ضربه از دیواره‌ی مقابل مخزن است. شکل‌های (٢٠ و ١٩) برای شرایط مختلف نشان می‌دهد در فشار کم‌تر و سرعت بیش‌تر مقدار آسیب انباشته شده برای هر امتداد بیش‌تر خواهد بود. برای حالت فشار ثابت کم‌ترین مقدار آسیب انباشته شده در عدسی پشتی و سرعت ١٢٠ کیلومتر در ساعت حدود ٠/٣٥ و بیش‌ترین مقدار در عدسی مقابل و سرعت ١٨٠ کیلومتر در ساعت حدود ٠/٤٩ است.

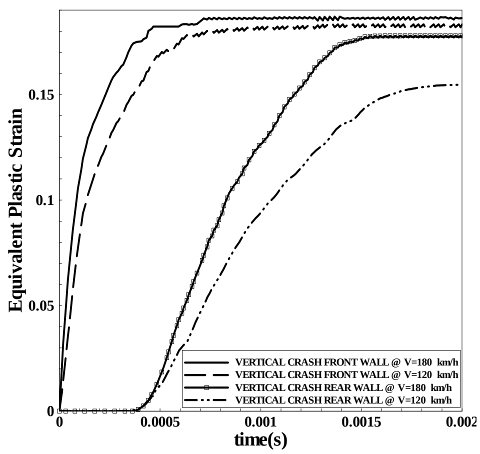
برای حالت سرعت ثابت کم‌ترین مقدار آسیب انباشته شده در عدسی پشتی و فشار ٢٠٠ bar حدود ٠/٣٩ و بیش‌ترین مقدار در عدسی مقابل و فشار ٥٠ bar حدود ٠/٥٣ است.



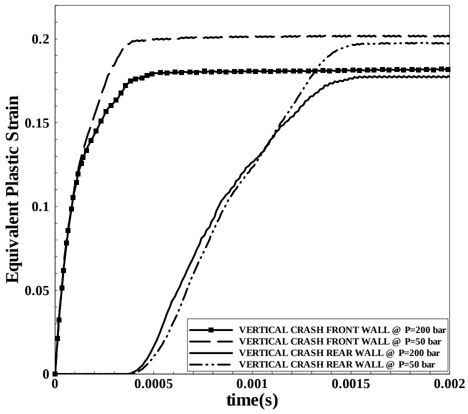
شکل ۱۹ رشد آسیب برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده‌ی تصادم عمودی در فشارکاری مخزن و سرعت‌های متفاوت



شکل ۲۰ رشد آسیب برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده‌ی تصادم عمودی در سرعت km/h ۱۸۰و فشارهای متفاوت مخزن



شکل ۲۱ کرنش پلاستیک معادل برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده‌ی تصادم عمودی در فشارکاری مخزن و سرعت‌های متفاوت



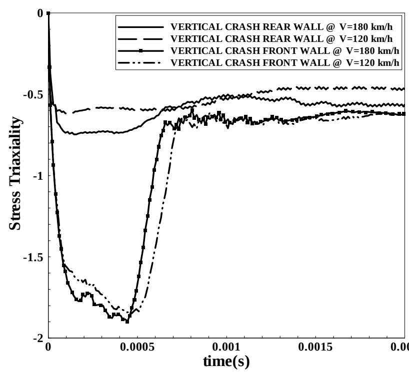
شکل ۲۲ تاریخچه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای نقطه‌ای در ناحیه‌ی زوال یافته‌ی تصادم عمودی در سرعت km/h ۱۸۰و فشارهای متفاوت

شکل‌های (۲۲ و ۲۱) نشان می‌دهد کرنش پلاستیک معادل نیز از الگوی رشد آسیب پیروی می‌کند و پس از مدتی به مقدار ثابتی می‌رسد. به عبارت دیگر تأثیر کرنش پلاستیک در رشد آسیب محسوس‌تر از تأثیر تنش سه‌محوره است. رشد کرنش پلاستیک معادل نیز در عدسی پشتی با تأخیر آغاز می‌شود و شیب رشد کم‌تری دارد و در نهایت مقدار کم‌تری را نسبت به عدسی مقابل کسب کرده است. برای هر امتداد در فشار کم‌تر و سرعت بالاتر، کرنش پلاستیک معادل بیش‌تری ایجاد شده است. برای حالت فشار ثابت کم‌ترین کرنش پلاستیک معادل در عدسی پشتی و سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت حدود ۰/۱۵ و بیش‌ترین مقدار در عدسی مقابل و سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت حدود ۰/۱۹ است و برای حالت سرعت ثابت کم‌ترین مقدار کرنش پلاستیک معادل در عدسی پشتی و فشار bar ۲۰۰ حدود ۰/۱۷ و بیش‌ترین مقدار در عدسی مقابل و فشار bar ۵۰ حدود ۰/۲۰ است. مطابق شکل‌های (۲۴ و ۲۳) تنش سه‌محوره در قسمت بزرگی از فرآیند برخورد در بازه‌ی ۰/۵- تا ۰/۷- تغییر می‌کند که نشان می‌دهد ناحیه‌ی آسیب‌دیده در حالت فشار قرار دارد. با توجه به نمودارهای تنش سه‌محوره در هر دو ناحیه‌ی آسیب‌دیده‌ی عدسی مقابل

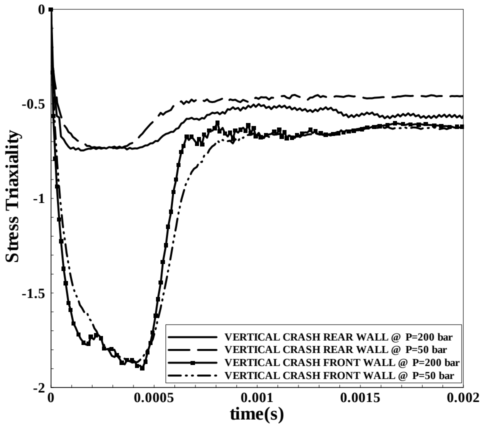
و پشتی، در ابتدای برخورد کاهشی به‌دلیل فشار غالب ناشی از خمش در جداره‌ی بیرونی دیواره‌ی مخزن رخ داده است که مقدار آن برای شرایط یکسان در عدسی مقابل بیش‌تر است. یعنی، در ابتدای برخورد عدسی مقابل فشار بیش‌تری را تحمل می‌کند.

پس از مدت حدود ۵ میلی‌ثانیه مقدار تنش سه‌محوره به مقدار ثابتی می‌رسد. بیش‌ترین افت تنش سه‌محوره تا مقدار تقریبی ۱/۹- در فشار ۲۰۰ bar و سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت برای المان‌های آسیب‌دیده‌ی عدسی مقابل رخ می‌دهد. با حذف المان‌های آسیب‌دیده در شکل‌های (۲۷-۲۵) مشاهده می‌شود عمق آسیب‌دیدگی دیواره‌ی مخزن در حالت‌های تصادم عمودی، از مقدار مجازدر استاندارد CSA (۱/۲۷ میلی‌متر) فراتر می‌رود و مخزن از کارافتاده تلقی شده و قابلیت استفاده ندارد.

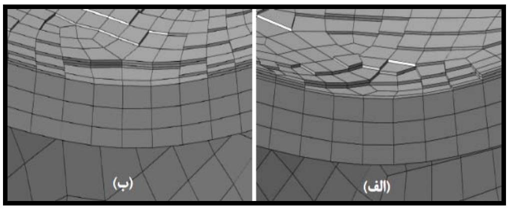
در فشار ۵۰ bar و شرایط یکسان مقدار عمق فرورفتگی نسبت به فشار ۲۰۰ bar بیش‌تر است؛ به عبارت دیگر در فشار داخلی کم‌تر و سرعت یکسان، مقدار آسیب وارد بیش‌تر است، همان‌طور که در سرعت برخورد بیش‌تر و فشار یکسان صدمه‌ی بیش‌تری به مخزن وارد شده است. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت در تصادم عمودی دیواره‌ی پشتی مخزن آسیب بیش‌تری را طی فرآیند برخورد متحمل می‌شود و ناحیه‌ی آسیب‌دیده‌ی بحرانی در تصادم عمودی محسوب می‌شود.



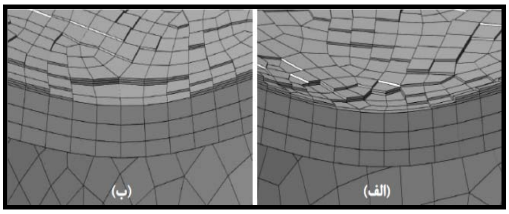
شکل ۲۳ تاریخچه‌ی تنش سه‌محوره برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده‌ی تصادم عمودی در فشار کاری مخزن و سرعت‌های متفاوت



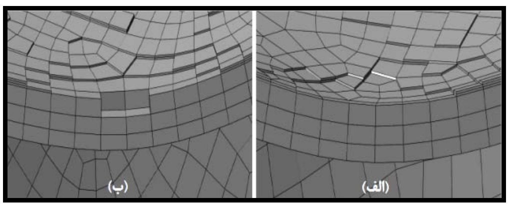
شکل ۲٤ تاریخچه تنش سه‌محوره برای نقطه‌ای در نواحی آسیب‌دیده تصادم عمودی در سرعت ۱۸۰ km/hو فشارهای متفاوت



شکل ۲۵ نواحی زوال یافته در تصادم عمودی برای فشار ۲۰۰ bar و سرعت ۱۲۰ km/h، الف-عدسی مقابل مخزن، ب-عدسی پشت مخزن

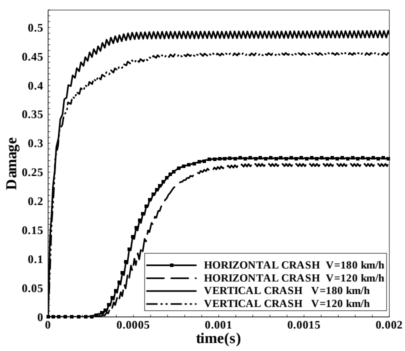


شکل ۲٦ نواحی زوال یافته در تصادم عمودی برای فشار ۲۰۰ bar و سرعت ۱۸۰ km/h، الف-عدسی مقابل مخزن، ب-عدسی پشت مخزن

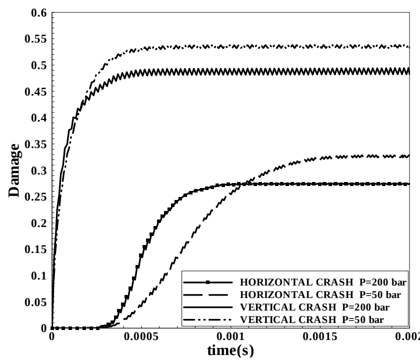


شکل ۲۷ نواحی زوال یافته در تصادم عمودی برای فشار ۵۰ bar و سرعت ۱۸۰ km/h، الف- عدسی مقابل مخزن، ب-عدسی پشت مخزن

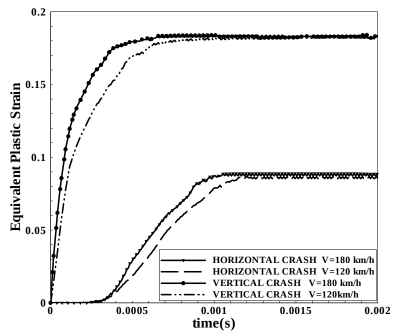
مقایسه‌ی تصادم در امتدادهای متفاوت. برای تعیین حالت بحرانی و وضعیت آسیب در مخزن، نتایج حاصل از تصادم افقی و عمودی مخزن در این بخش مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل‌های (۲۹ و ۲۸) نشان می‌دهد آسیب در حالت‌های مختلف تصادم به‌سرعت رشد می‌کند و پس از مدت کوتاهی به مقدار ثابتی می‌رسد. برای امتداد عمودی نسبت به افقی مقدار انباشتگی آسیب برای شرایط یکسان تقریباً دو برابر می‌شود، المان‌های بیش‌تری دچار آسیب می‌گردند و در نتیجه عمق آسیب‌دیدگی در مخزن بیش‌تر است. نمودارها نشان می‌دهد در فشار کم‌تر و سرعت بیش‌تر مقدار آسیب انباشته شده برای هر دو امتداد بیش‌تر است. هم‌چنین مقایسه‌ی کمی انباشتگی آسیب در نقاط معرفی شده، نشان می‌دهد که در حالت فشار ثابت کم‌ترین مقدار آسیب انباشته شده در دیوار پشتی در برخورد افقی و سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت حدود ۰/۲۶ است و بیش‌ترین مقدار در عدسی مقابل در برخورد عمودی در سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت حدود ۰/۴۹ است. برای حالت سرعت ثابت کم‌ترین مقدار آسیب انباشته شده در دیوار پشتی برخورد افقی و فشار 200 bar حدود ۰/۲۷ و بیش‌ترین مقدار در عدسی مقابل در برخورد عمودی و فشار 50 bar حدود ۰/۵۳ است. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی کرنش پلاستیک معادل بین نقاط بحرانی تصادم در شکل‌های (۳۱ و ۳۰) آمده است. مقدار کرنش پلاستیک ایجاد شده در سرعت و فشار برابر برای امتداد عمودی تقریباً دو برابر امتداد افقی است. از طرف دیگر، برای هر دو امتداد برخورد در فشار کم‌تر و سرعت بالاتر، کرنش پلاستیک بیش‌تری ایجاد شده است.



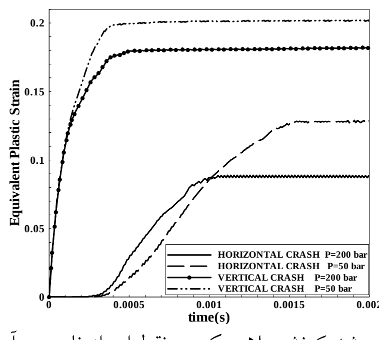
شکل ۲۸ رشد آسیب در نقطه‌ای از ناحیه‌ی آسیب‌دیده‌ی بحرانی برای تصادم در فشارکاری مخزن برای حالت‌های افقی و عمودی



شکل ۲۹ رشد آسیب در نقطه‌ای از ناحیه‌ی آسیب‌دیده‌ی بحرانی در تصادم سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت برای حالت افقی و عمودی



شکل ۳۰ تاریخچه کرنش پلاستیک معادل در نقطه‌ای از ناحیه‌ی آسیب‌دیده‌ی بحرانی برای تصادم در فشارکاری برای حالت افقی و عمودی



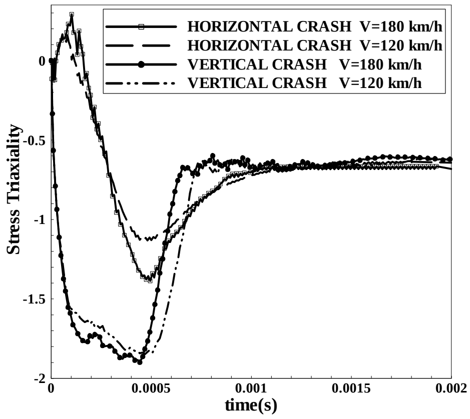
شکل ۳۱ رشد کرنش پلاستیک در نقطه‌ای از ناحیه‌ی آسیب‌دیده در سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت برای حالت افقی و عمودی

مقایسه‌ی کمی کرنش پلاستیک معادل بین نقاط مذکور نشان می‌دهد که در حالت فشار ثابت کم‌ترین مقدار کرنش پلاستیک معادل در دیوار پشتی برخورد افقی و سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت حدود ۰/۰۸۵ است و بیش‌ترین مقدار در عدسی مقابل برخورد عمودی در سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت حدود ۰/۱۸ است. برای حالت سرعت ثابت کم‌ترین مقدار کرنش پلاستیک معادل در دیوار پشتی برخورد افقی و فشار ۲۰۰bar حدود ۰/۸۵ و بیش‌ترین مقدار در عدسی مقابل برخورد عمودی در فشار bar ۵۰ حدود ۰/۲ است.

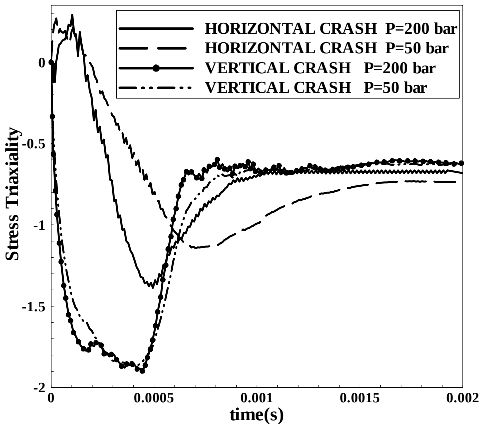
تاریخچه‌ی تنش سه‌محوره برای نواحی بحرانی امتدادهای مختلف تصادم - شکل‌های (۳۳ و ۳۲) نشان می‌دهد این نواحی در قسمت بزرگی از فرآیند برخورد تحت تنش سه‌محوره کم‌تر از ۰/۵- قرار دارند بیانگر تنش فشاری غالب در منطقه‌ی آسیب‌دیده است.

پس از آغاز برخورد افت بیش‌تری در نمودار ناحیه‌ی بحرانی تصادم عمودی رخ داده است که نشان دهنده‌ی فشار بیش‌تر ناشی از خمش بر اثر برخورد در این جهت است. پس از گذشت حدود ۰/۷ میلی‌ثانیه تنش سه‌محوره به مقدار ثابتی می‌رسد. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه‌ی اجزای محدود، مقدار آسیب برای دو شبکه به‌طورمتفاوت محاسبه شد. شکل (۳٤) رشد آسیب در فشار کاری مخزن و سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت را برای نقطه‌ای در ناحیه‌ی بحرانی تصادم در امتداد عمودی و افقی و برای حالتی که ناحیه‌ی خارجی جداره مخزن تا عمق ۱/۲۷ میلی‌متر (مقدار بیشینه عمق آسیب‌دیدگی) دارای پنج یا ده گره باشد نمایش می‌دهد.

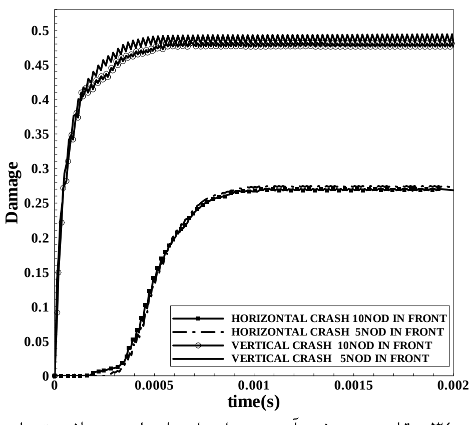
نزدیکی نتایج نشان دهنده‌ی عدم وابستگی نتایج به‌دست آمده به شبکه‌بندی اجزای محدود است.



شکل ۳۲ مقایسه‌ی تاریخچه‌ی تنش سه‌محوره در ناحیه‌ی آسیب‌دیده‌ی بحرانی برای تصادم در فشارکاری برای حالت‌های افقی و عمودی



شکل ۳۳ مقایسه‌ی تاریخچه‌ی تنش سه‌محوره در ناحیه‌ی آسیب‌دیده در سرعت ۱۸۰ کیلومتر در ساعت برای حالت‌های افقی و عمودی



شکل ۳٤ مقایسه‌ی رشد آسیب برای امتدادهای مختلف تصادم در فشار کاری در ناحیه‌ی خارجی جداره‌ی مخزن

نتیجه‌گیری

در این تحقیق پدیده‌ی برخورد مخزن در امتدادهای مختلف شبیه‌سازی گردید و تأثیر فشار داخل مخزن و سرعت تصادم در آسیب ناشی از برخورد برای حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد بیش‌ترین مقدار آسیب در جهت عمودی برخورد اتفاق می‌افتد و با تغییر زاویه‌ی برخورد از امتداد عمودی به افقی، مقدار آسیب وارد کم‌تر خواهد شد. با حذف المان‌های آسیب‌دیده و با مقایسه‌ی عمق آسیب‌دیدگی ناشی از برخورد، با استاندارد CSA مشاهده شد که در بیش‌تر حالت‌های تصادم عمودی، احتمال از کار افتادگی مخزن نسبت به تصادم افقی بیش‌تر است. در تصادم افقی به دیواره‌ی پشتی مخزن و در تصادم عمودی به عدسی مقابل مخزن آسیب بیش‌تری وارد می‌شود. هنگام برخورد مخزن بدون در نظر گرفتن جهت برخورد می‌توان گفت که در فشار داخلی کم‌تر و سرعت برخورد بالاتر صدمه‌ی واردشده بیش‌تر خواهد بود.

مراجع

1. Becker, D.L., Burgess, D.M., and Lindquist, M.R. "Drop Testing Conducted to Benchmark the Shipping Port Reactor Pressure Vessel Package Safety Analysis", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 130, pp. 133-145, (1991).
2. Olsen, G.D. and Nolen, A.M., "NASA/MSFC Space Debris Impact Facility Test Reports", (1993).
3. Rosenberg, Z., Mironi, J., Cohen, A. and Levy, P., "On the Catastrophic Failure of High-Pressure Vessels by Projectile Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 15, pp. 827-831, (1994).
4. Fasanella, E.L., Jackson, K.E., Jones, Y.T., Frings, G. and Vu, T., "Crash Simulation of a Boeing 737 Fuselage Section Vertical Drop Test", FAA Technical Center in Atlantic City, (1999).
5. Hiermaier, S. and Schafer, F., "Hypervelocity Impact Fragment Clouds in High Pressure Gas Numerical and Experimental Investigations", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 23, pp. 391-400, (1999).
6. Telitchev, I.Y., Schafer, F.K., Schneider, E.E. and Lambert, M., "Analysis of The Fracture of Gas-Filled Pressure Vessels under Hypervelocity Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 23, pp. 905-919, (1999).
7. Mahé, M., Ribet, H. and Le Page, F., "Composite Fuselage Crash FE Modeling Dedicated to Enhance the Design in Correlation with Full Scale Drop Test", *Mécanique & industries*, Vol. 2, pp. 5–17, (2001).
8. Nagel, G.M. and Thambiratnam, D.P., "Dynamic Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin Walled Tubes under Oblique Impact Loading", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 1595-1620, (2006).
9. Shirai, K. and Saegusa, T., "Demonstrative Drop Tests of Transport and Storage Full Scale Canisters with High Corrosion-Resistant Material", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 1241–1249, (2008).
10. Zhang, X.W. and Yu, T.X., "Energy Absorption of Pressurized Thin-Walled Circular Tubes under Axial Crushing", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 51, pp. 335–349, (2009).

11. Lee, L.S., Aidy, A., Sanuddin, A.B. and Afshar, R., "Simulation and Experimental Work on a Thin Walled Structure under Crushing", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 10, pp. 143–151, (2010).
12. Zhanga, Y., Huangb, Z., Zhengb, Z., Wu, B. and Zhuc, X., "Composite cylinders of natural gas vehicles simulation crash test", *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 18, pp. 164–173, (2013).
13. Teng, X. and Wierzbicki, T., "Evaluation of Six Fracture Models in High Velocity Perforation", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 1653–1678, (2006).
14. Johnson, G.R. and Cook, W.H., "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures", *Proceedings of the seventh international symposium on ballistics,* pp. 541–47, Hague, Netherlands, (1983).
15. Johnson, G.R. and Cook, W.H., "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21(1), pp. 31–48, (1985).
16. Teng, X., "High Velocity Impact Fracture", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2004).
17. CSA America Inc. "CNG Fuel System Inspector Study Guide", National Energy Technology Laboratory, U. S. Department of Energy, DE-FC26-05NT42608, pp. 27-32, (2008).
18. Ribarits, S.G., "Assessment of Inspection Criteria and Techniques for Recertification of natural Gas Vehicle (NGV) Storage Cylinders", MSc. thesis, Mechanical Engineering Department, University of British Colombia, (1983).
19. Mescall, J.F., "Computer Simulation of Penetration", *Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Society of Engineering Science*, pp. 81–93, Pennsylvania, USA, (1977).